

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivo Marić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić, dipl. ing.

Student:

Ivo Marić

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici Tanji Jurčević Lulić na pruženoj pomoći, savjetima i dodatnoj literaturi prilikom izrade završnog rada.

Ivo Marić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivo Marić**

Mat. br.: 0035178571

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Biomehanika ovojnice oka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Biomechanics of the eye membrane**

Opis zadatka:

Fibrozna ovojnica oka je primjer biomehaničkog membranskog sustava. Fibrozna ovojnica ima potpornu funkciju te održava oblik i veličinu oka, pruža otpor unutarnjem očnom tlaku, štiti unutarnju strukturu oka te predstavlja hvatište za vanjske mišiće oka. Prednji dio je proziran i naziva se rožnica (*kornea*), dok je stražnji dio neproziran i zove se bjeloočnica (sklera). Djelovanje mehaničkih sila na stijenke očne jabučice može se objasniti pomoću teorije tankih ljusaka i membrana.

Potrebno je:

- opisati građu fibrozne ovojnice oka,
- objasniti mehanička svojstva bjeloočnice i rožnice,
- utvrditi normalna naprezanja u stijenci oka ako prosječan unutarnji očni tlak iznosi 2.67 kPa,
- odrediti sile u prstenu na sklero-kornealnoj granici.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

15. travnja 2013.

Rok predaje rada:

1. rok: 11. srpnja 2013.

2. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:


1. rok: 15. - 17. srpnja 2013.

2. rok: 18. - 20. rujna 2013.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS OZNAKA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY.....	VI
1. UVOD.....	1
1.1. Predmet rada.....	1
1.2. Struktura rada.....	1
2. GRAĐA I FUNKCIJA OKA.....	2
3. GEOMETRIJA OKA.....	5
4. INTRAOKULARNI TLAK.....	7
5. GRAĐA VANJSKE FIBROZNE OVOJNICE OKA.....	9
5.1. Rožnica.....	9
5.1.1. Funkcija rožnice.....	9
5.1.2. Geometrija rožnice.....	9
5.1.3. Građa rožnice.....	9
5.1.3.1. Rožnički epitel.....	10
5.1.3.2. Bowmanova membrana.....	11
5.1.3.3. Stroma.....	11
5.1.3.4. Dua sloj.....	11
5.1.3.5. Descemetova membrana.....	12
5.1.3.6. Rožnički endotel.....	12
5.2. Bjeloočnica.....	12

5.2.1. Funkcija.....	12
5.2.2. Geometrija bjeloočnice.....	13
5.2.3. Građa bjeloočnice.....	15
5.2.3.1. Episklera.....	16
5.2.3.2. Stroma.....	16
5.2.3.3. Lamina fusca.....	16
5.2.4. Strukturalna organizacija bjeloočnice.....	16
5.2.4.1. Proteoglikani.....	17
5.2.4.2. Elastinska vlakna.....	17
5.2.4.3. Fibroblasti.....	18
5.2.4.4. Ostale komponente.....	18
5.3. Kratka usporedba strukture rožnice i bjeloočnice.....	18
6. BIOMEHANIČKA ANALIZA VANJSKE OVOJNICE OKA.....	19
6.1. Mehanička svojstva rožnice.....	19
6.2. Mehanička svojstva bjeloočnice.....	20
6.3. Primjena teorije ljsaka.....	23
6.3.1. Membranska naprezanja u bjeloočnici.....	23
6.3.2. Određivanje sile u prstenu na granici rožnice i bjeloočnice.....	28
7. ZAKLJUČAK.....	33
LITERATURA.....	34

POPIS SLIKA

Slika 1. Dijelovi oka.....	4
Slika 2. Vanjska fibrozna ovojnica oka.....	4
Slika 3. Pojednostavljeni model očne jabučice.....	5
Slika 4. Osnovne dimenzije oka.....	6
Slika 5. Djelovanje intraokularnog tlaka.....	7
Slika 6. Odvođenje očne vodice.....	8
Slika 7. Slojevi rožnice.....	10
Slika 8. Vanjski očni mišići.....	13
Slika 9. Prednji i stražnji otvor lijevog oka.....	14
Slika 10. <i>Lamina cribrosa</i> pod skenirajućim elektronskim mikroskopom.....	15
Slika 11. Koordinatni sustav na bjeloočnici.....	20
Slika 12. Koordinatni sustav na bjeloočnici u trodimenzionalnom prikazu.....	21
Slika 13. Membranske sile u bjeloočnici.....	24
Slika 14. Ravnoteža diferencijalnog elementa ljuske.....	24
Slika 15. Membranska naprezanja.....	26
Slika 16. Sile u prstenu na spoju rožnice i bjeloočnice.....	29
Slika 17. Sile u prstenu.....	30
Slika 18. Ravnotežni položaj prstena.....	32
Slika 19. Eliptični oblik prstena.....	32

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	mm	horizontalna poluos elipse
b	mm	vertikalna poluos elipse
δ	mm	debljina stijenke
e	mm	udaljenost središta bjeloočnice i rožnice
ε	/	deformacija
E	N/mm ²	modul elastičnosti
F_p	N	sila u prstenu
G	N/mm ²	modul smicanja
N_r	N/mm	radijalna sila prstena
$N_\vartheta^R, N_\vartheta^B$	N/mm	sile u rožnici i bjeloočnici na mjestu spoja
p	Pa	intraokularni tlak
p_s	Pa	suprakoroidalni tlak
p_2	Pa	intraorbitalni tlak
R_B, R_R	mm	polumjeri bjeloočnice i rožnice
r_1, r_2	mm	glavni polumjeri zakrivljenosti ljuske
S_1, S_2	N/mm	membranske sile u bjeloočnici
φ, ϑ	rad	kut
σ	N/mm ²	naprezanje
P_v, P_h	N/mm	sile vertikalnog i horizontalnog para mišića

SAŽETAK

Vanjska fibrozna ovojnica oka je primjer biomehaničkog sustava tankih ljuski. Fibrozna ovojnica ima potpornu funkciju te održava oblik i veličinu oka, opire se intraokularnom tlaku, štiti unutarnju strukturu oka i predstavlja hvatište za vanjske očne mišiće koji pokreću očnu jabučicu. Sastoji se od prozirne rožnice na prednjem dijelu i neprozirne bjeloočnice na stražnjem dijelu. Svrha ovog rada je detaljno opisati građu i mehanička svojstva fibrozne ovojnice oka, izračunati membranska naprezanja na pojedinim dijelovima bjeloočnice pri normalnom intraokularnom tlaku od 2,67 kPa koristeći model tanke sferne ljuske te izračunati sile u prstenu na mjestu spoja rožnice i bjeloočnice.

Ključne riječi: biomehanika, intraokularni tlak, fibrozna ovojnica, bjeloočnica, rožnica, ljuske.

SUMMARY

The fibrous tunic of the eye is an example of a biomechanical system of thin plates and shells. The fibrous tunic resists the intraocular pressure and maintains constant eyeball geometry. It also protects internal structures of the eye and forms the surface to which the external ocular muscles attach. It is composed of transparent cornea and opaque sclera. The main objective of this study is to describe the structure and mechanical properties of the fibrous tunic, to determine the internal stress in sclera as a thin spherical shell and to determine forces in sclero-corneal ring.

Key words: biomechanics, intraocular pressure, fibrous tunic of the eye, cornea, sclera, thin plates and shells.

1. UVOD

Inženjerski principi se u području medicine koriste kako bi se objasnili, analizirali i unaprijedili kirurški zahvati s konačnim ciljem unaprijeđenja kvalitete života. Zahvati na ljudskom oku su u većini slučajeva invazivne prirode, a budući da je oko složen organ s vrlo kompliciranim tkivima, takvi zahvati povlače za sobom određeni rizik. Kako bi se rizik smanjio, potrebno je što bolje razumjeti i opisati biomehaniku oka, područje koje je još uvijek nedovoljno istraženo.

U novije vrijeme ogroman rast je doživjela refrakcijska kirurgija koja neprestano napreduje i razvijaju se nove tehnike. Refrakcijska operacija oka je svaka operacija oka koja se koristi za poboljšanje stanja refrakcije oka i pri kojoj se smanjuje ili eliminira ovisnost o naočalama ili kontaktnim lećama. U užem smislu govori se o mijenjaju zakrivljenosti vanjskog sloja rožnice pomoću lasera. Prilikom refrakcijskog zahvata dolazi do prekidanja kolagenskih vlakana, preraspodjele naprezanja i mijenjanja optičkih svojstava oka, a samo male greške u postupku mogu dovesti do neuspjeha zahvata.

Također, istraživanje biomehanike oka nužno je za razumijevanje glaukoma tj. povišenog intraokularnog tlaka, koji je drugi glavni uzrok sljepoće u svijetu.

1.1. Predmet rada

U završnom radu opisana je građa i biomehanička analiza vanjske ovojnice oka s naglaskom na izračunavanju membranskih naprezanja u bjeloočnici odnosno sila na spoju bjeloočnice i rožnice pomoću teorije tankih osnosimetričnih ljusaka.

1.2. Struktura rada

Završni rad podijeljen je u sedam poglavlja uključujući uvod i zaključak. U drugom poglavlju je ukratko opisana građa i funkcija oka. U trećem poglavlju se govori o geometriji očne jabučice te su navedene njene osnovne dimenzije. Zatim slijedi kratka analiza djelovanja intraokularnog tlaka i bolestima vezanim uz njega. Peto poglavlje je najopširnije i obuhvaća detaljan opis građe bjeloočnice i rožnice te njihove geometrije. Naglasak je stavljen na šesto poglavlje u kojem se opisuju mehanička svojstva vanjske ovojnice oka te izračun sila i naprezanja koristeći teoriju ljusaka.

2. GRAĐA I FUNKCIJA OKA

Oko je organ koji služi za pretvaranje svjetlosti u živčane impulse. Ljudsko oko je parni organ kojemu je princip rada sličan fotoaparatom i kamerama: prozirni prednji dijelovi oka lome zrake svjetlosti projicirajući umanjenu i obrnutu sliku na fotosenzitivnu mrežnicu gdje se u specijaliziranim živčanim stanicama obavlja pretvorba u električne živčane impulse. Oko je najvažnije ljudsko osjetilo jer njime primamo 90% svih informacija iz okoline. Omogućuje svjesnu percepciju svjetla, razlikovanje boja i percepciju dubine.

U području oka djeluje niz morfološko-funkcionalnih sustava: optički, akomodacijski, sustav vanjskih očnih mišića, fotoreceptivni, živčani, sustav stvaranja i cirkuliranja očne vodice, krvožilni, zaštitni aparat oka i sustav za održavanje oblika i dimenzija oka. Osnovnu ulogu u tom posljednjem sustavu ima vanjska fibrozna ovojnica oka (slika 2), a njena strukturna i biomehanička analiza je središnja tema ovog rada.

Svako oko pokreće po tri para očnih mišića: dva para ravnih, i jedan par kosih mišića. Očna jabučica je pokretljiva oko sve tri osi, poput kardanskog zgloba.

Očna jabučica ima tri ovojnice. Vanjska fibrozna ovojnica je na prednjem dijelu prozirna i naziva se rožnica (*cornea*), a u stražnjem dijelu je neprozirna bjeloočnica (*sclera*). Rožnica ima potpurnu i optičku ulogu, a bjeloočnica samo potpurnu. Bjeloočnica daje oku stanovitu čvrstoću i oblik i na nju se spajaju vanjski očni mišići (druga njihova hvatišta su na stijenkama očne šupljine: ravnih i donjeg kosog na vezivnom prstenu oko optičkog živca u vrhu očne šupljine, dok se gornji kosi mišić pripaja na gornju koštanu stijenku očne šupljine).

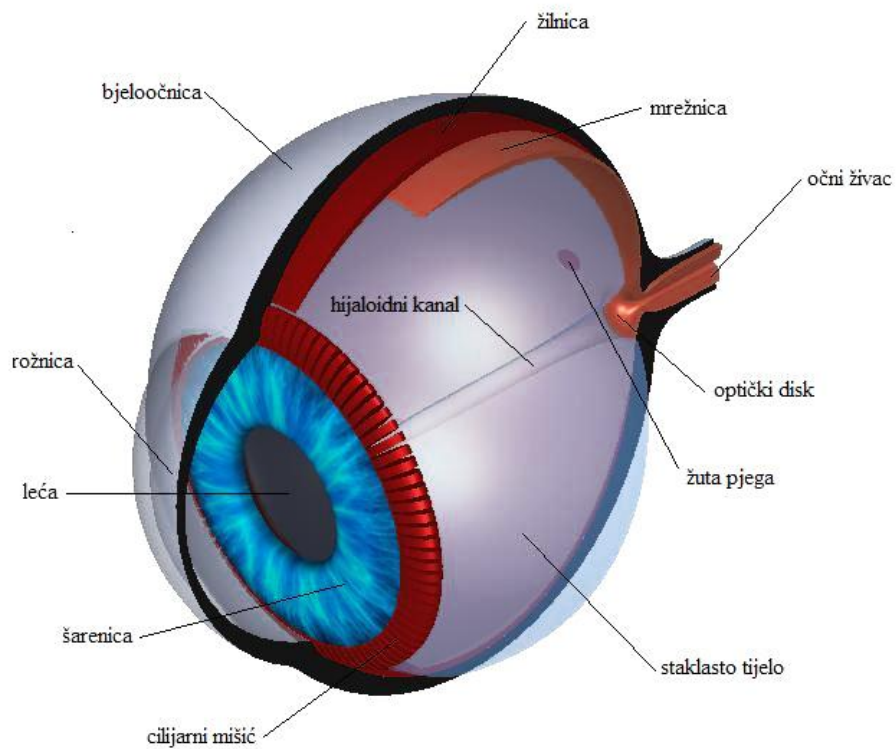
Ispod bjeloočnice je srednja očna ovojnica ili *uvea*, koju čine žilnica, šarenica i cilijarno tijelo. Ona je prokrvljena mnogim krvnim žilama. Žilnica ili *coroidea* osigurava kisik i prehranu vanjskim slojevima mrežnice te sadrži pigment koji sprečava prodiranje svjetlosti u očnu jabučicu na bilo kom mjestu osim zjenice. Boja šarenice ovisi o količini pigmenta; što je više pigmenta, to je oko tamnije. Najviše pigmenta sadrže tamnosmeđe šarenice, potom svijetlosmeđe, zelene, a najmanje pigmenta imaju plave šarenice. Albino ljudi u očima nemaju pigmenta i šarenice su im prozirne, pa se zbog odraza svjetlosti s krvnih žila šarenice, žilnice i mrežnice čini da su im šarenice sivkastoružičaste.

Unutarnji sloj očne jabučice čini mrežnica koja ima dva dijela: optički i slijepi. Mrežnica je poluprozirna membrana sastavljena od četrdesetak vrsta živčanih stanica odgovornih za pretvaranje svjetlosti u živčane impulse. Iako je eksperimentima utvrđeno da se broj

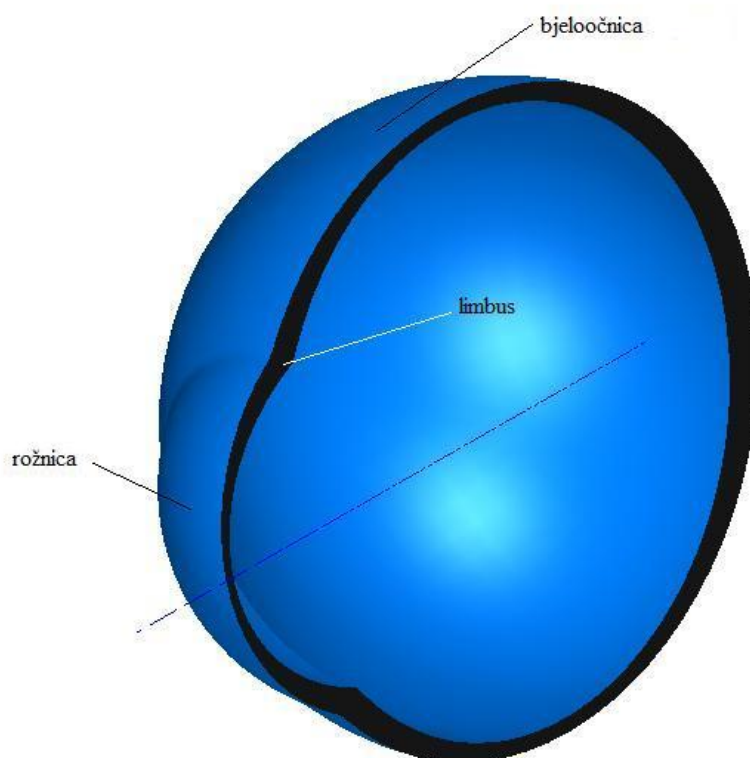
fotoreceptivnih stanica među ljudima razlikuje i do 40 puta, ljudi percipiraju iste boje. To je iz razloga što je za percepciju boja najvećim dijelom odgovoran mozak [3]. Dio mrežnice odgovoran za oštrinu vida je žuta pjega ili *macula*. Žuta pjega je središnji dio mrežnice gdje su živčane stanice najgušće raspoređene. Pored žute pjege nalazi se početak vidnog živca koji je neosjetljiv na svjetlo, pa se njegova projekcija u vidnom polju naziva optički disk ili slijepa pjega. Iako se krvožilni sustav mrežnice nalazi ispred vidnih fotoreceptora, ljudi ih ne percipiraju iz razloga što ljudski mozak ignorira statičke objekte u vidnom polju.

Ispod očnih ovojnica nalaze se fleksibilna leća, staklasto tijelo i očna vodica koja je sadržana u prednjoj i stražnjoj očnoj sobici. Prednja očna sobica je prostor između rožnice i šarenice, a stražnja očna sobica je prostor između šarenice i leće. Staklasto tijelo je dio oka koji najvećim dijelom ispunjava unutrašnjost očne jabučice. Jedna od zanimljivosti koja se tiče staklastog tijela jest pojava tzv. plutajućih mutnina. Plutajuće mutnine su posljedica pojave ostataka različitih veličina, oblika, konzistencije, indeksa loma svjetlosti i različite pokretljivosti unutar normalno prozirnog staklastog tijela oka. Mogu biti embriološkog porijekla ili stečene uslijed degenerativnih promjena staklastog tijela ili mrežnice oka. Viđenje takvih mutnina poznato je pod nazivom *myodesopsia*. Zamućenja se uočavaju u vidnom polju zbog sjene koju plutajući ostaci tvore na mrežnici. Najčešće se pojavljuju u obliku mrljica te nitastih ili paučinastih tvorbi koje polagano plutaju pred očima. Budući da ti objekti doista postoje unutar oka, oni nisu perceptivne varke već su entoptički fenomen.

Jedan specifičan tip zamućenja poznat je pod nazivom 'leteće mušice' (lat. *Muscae volantes*), a oblika su sitnih mrljica, poput letećih mušica. To je normalan fenomen prisutan kod većine ljudi, a njihova pojava pripisuje se ostacima struktura prisutnih u staklastom tijelu oka u doba fetalnoga razvoja. Najčešće se primjećuje prilikom gledanja u bijeli zid ili monokromatsku plavu boju vedrog neba. Dijelovi oka su prikazani na slici 1.



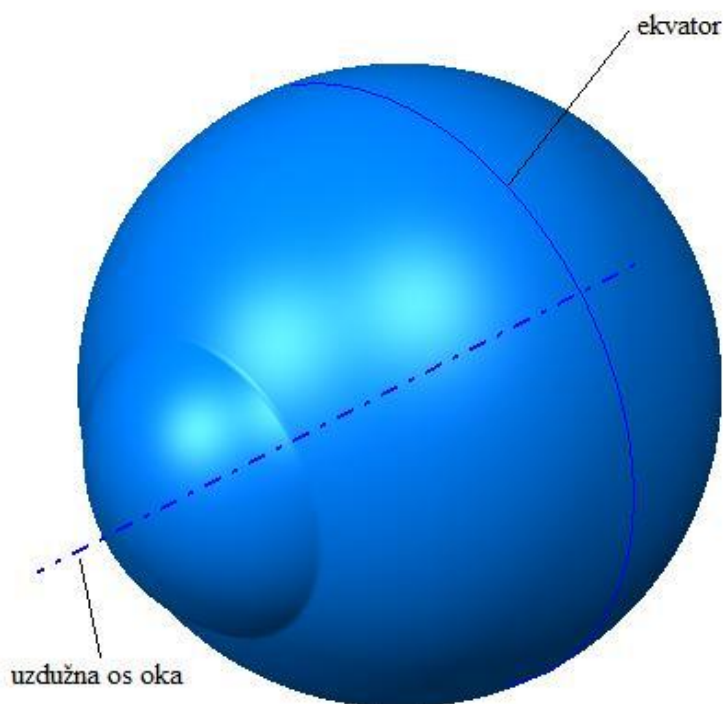
Slika 1. Dijelovi oka



Slika 2. Vanjska fibrozna ovojnica oka

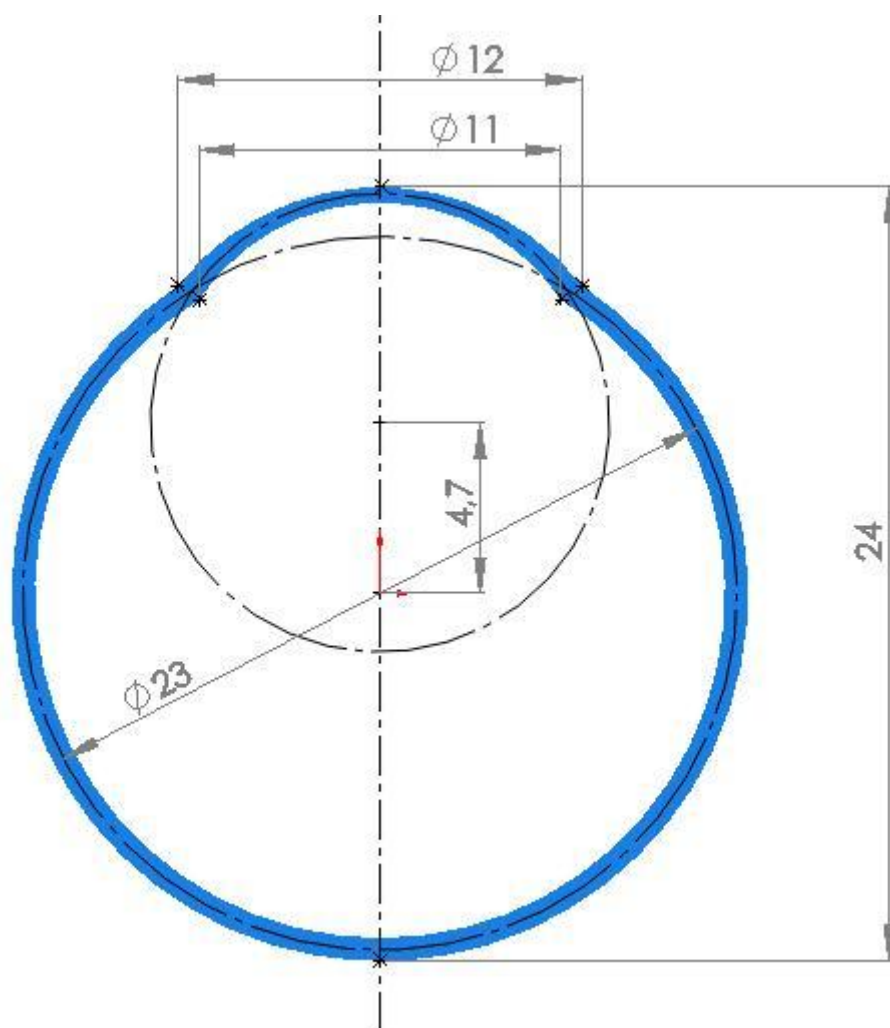
3. GEOMETRIJA OKA

Očna jabučica može se jednostavno prikazati kao tijelo koje se sastoji od dva spojena kuglasta elementa različitih polumjera, kao što je prikazano na slici 3. Mjesto spoja naziva se limbus (slika 2).



Slika 3. Pojednostavljeni model očne jabučice

Oblik i dimenzije oka odraslog čovjeka su među populacijom uglavnom konstantni, a odstupanja iznose maksimalno do 2 mm. U tom kontekstu se može govoriti samo o prosječnim vrijednostima dimenzija oka među ljudskom populacijom. Duljina očne jabučice uzduž osi oka iznosi oko 24 mm, ali pri jakoj miopiji (kratkovidnosti) doseže i 28 mm, a promjer na ekvatoru iznosi u prosjeku 23 mm [10]. Odstupanja u promjeru bjeloočnice na pojedinim mjestima su zanemarujuća te se bjeloočnica može aproksimirati kuglom. Promjena duljine očne jabučice od samo 0,3 mm u smjeru uzdužne osi oka dovodi do promjene vida za 1 dioptriju [1]. Udaljenost između središta rožnice i bjeloočnice na uzdužnoj osi oka iznosi prosječno 4,7 mm [4]. Osnovne dimenzije oka prikazane su na slici 4.



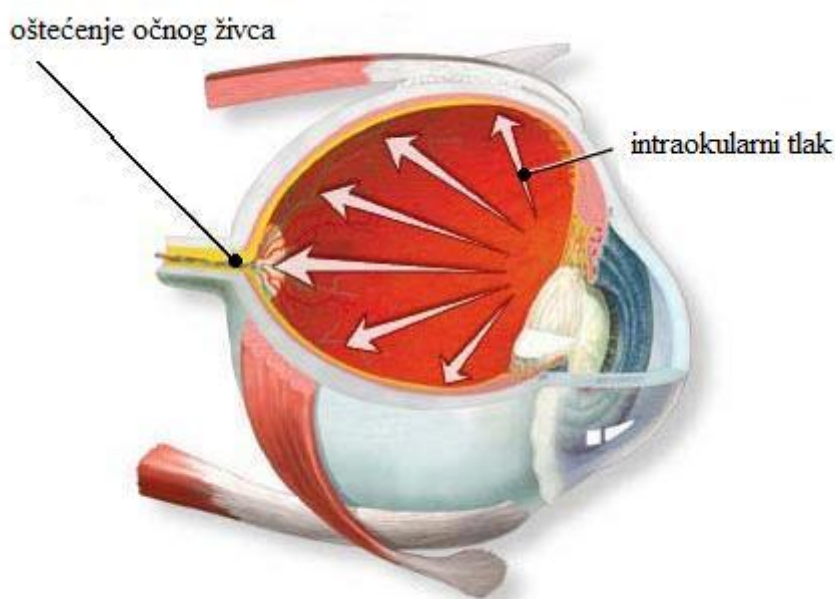
Slika 4. Osnovne dimenzije oka

4. INTRAOKULARNI TLAK

Intraokularni tlak rezultat je ravnoteže funkcije cilijarnih nastavaka koji proizvode očnu vodicu, strukture staklastog tijela i sustava za resorpciju očne vodice te drenažnih vena. Pri tome važnu ulogu imaju leća, akomodacijski sustav oka, morfološka građa i funkcionalnost šarenice, prednje očne komore, pritisak vanjskih očnih mišića, atmosferski tlak, pritisak vjeđa itd. Ljudsko oko proizvodi očnu vodicu koja hrani očnu leću, šarenicu i unutrašnjost oka te održava tonus (napetost) oka. Očna vodica stalno protječe kroz oko, a preko niza sitnih otvora ispred šarenice (tzv. trabekularna mreža) istječe iz oka u krvotok.

Normalan intraokularni tlak kreće se između 2,20 i 3,73 kPa, u prosjeku 2,67 kPa (20 mm Hg) [1]. Intraokularni tlak napinje očnu jabučicu do stalnog oblika i dimenzija.

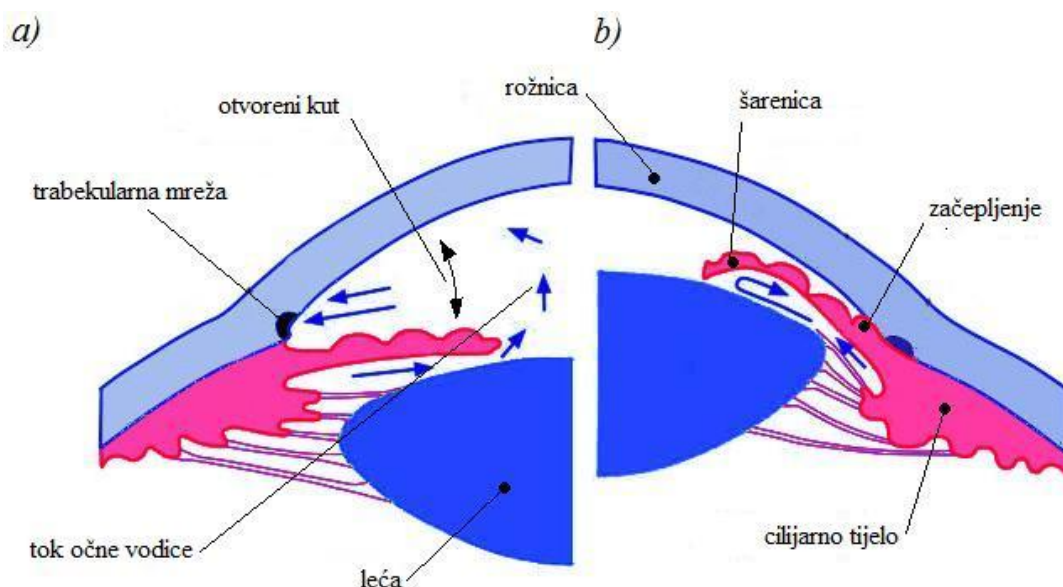
U slučaju začepljenja sitnih otvora ispred šarenice, očna vodica slabije otječe pa se povećava intraokularni tlak. Pri izrazitom povećanju intraokularnog tlaka (glaukom) može doći do popuštanja bjeloočnice u stražnjem dijelu što za posljedicu ima oštećenje oćnog živca i gubitak vida.



Slika 5. Djelovanje intraokularnog tlaka [6]

Kada dođe do nastanka glaukoma, cijeli proces polagano postaje neprekidna petlja, jer u oku koje je uslijed povišenog tlaka deformirano dolazi do smanjenja kuta između šarenice i rožnice što dovodi do začepljenja kanala za odvod očne vodice i naglog porasta intraokularnog tlaka. Slika 6. prikazuje otjecanje očne vodice kod normalnog intraokularnog tlaka (a) i kod povišenog intraokularnog tlaka (b).

Veći broj poremećaja ili bolesti oka, kao što su glaukom, miopija, astigmatizam rožnice, ablacija mrežnice, povezani su sa strukturnim i mehaničkim promjenama u oku. Bolesti i kirurški zahvati mijenjaju mehaničke značajke bjeloočnice i raspored naprezanja u njoj.



Slika 6. Odvođenje očne vodice [5]

5. GRAĐA VANJSKE FIBROZNE OVOJNICE OKA

5.1. Rožnica

5.1.1 Funkcija rožnice

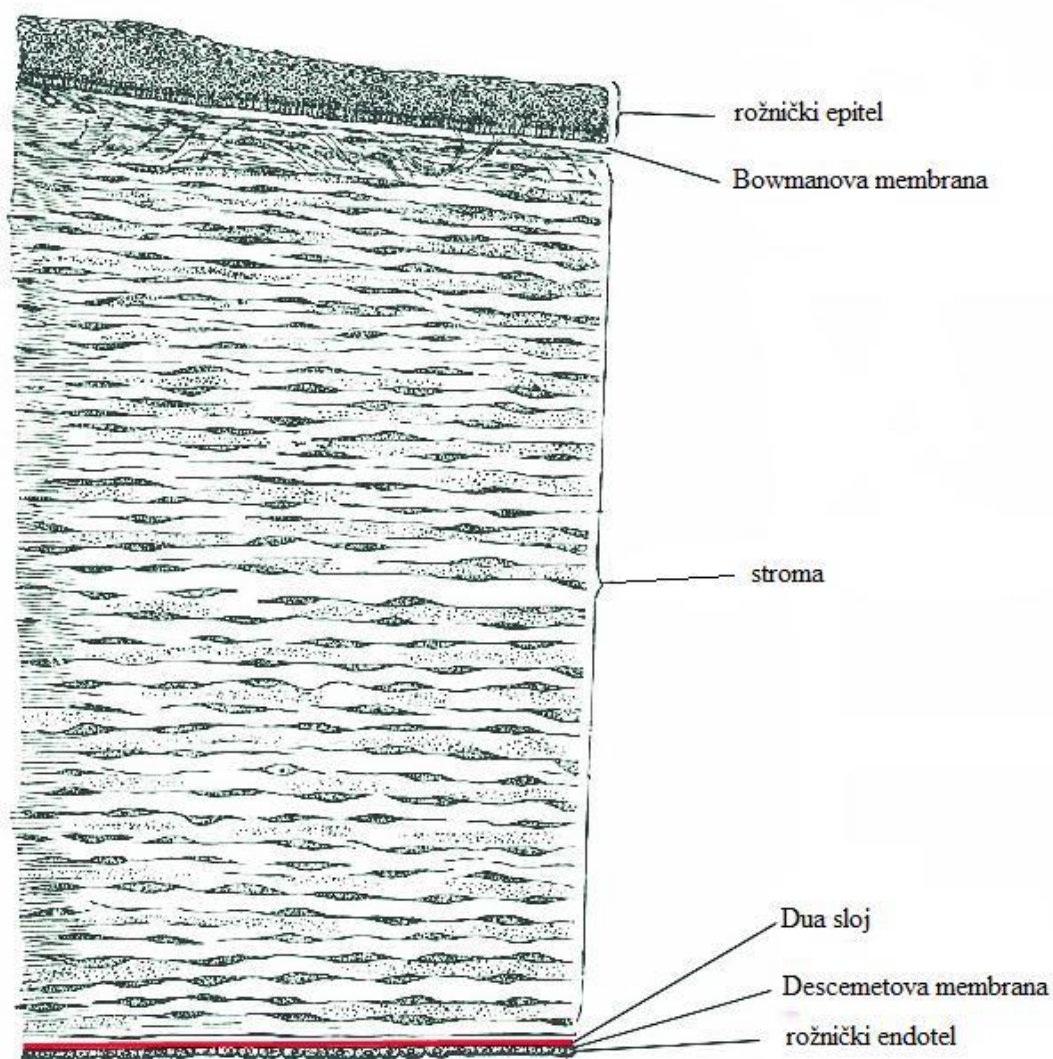
Rožnica je prozirni prednji dio vanjske očne ovojnice koji prekriva šarenicu, zjenicu i prednju očnu sobicu. Rožnica je odgovorna za gotovo dvije trećine optičke snage oka. Njena optička snaga je konstantna dok leća, s druge strane, ima varijabilni fokus koji se prilagođava ovisno o udaljenosti promatranog predmeta. Budući da je prozirnost jedna od najbitnijih karakteristika rožnice, ona je bez krvnih žila. Hranjive tvari prima difuzijom iz suza s vanjske strane i očne vodice s unutarnje strane, a kisik dobiva direktno iz zraka.

5.1.2. Geometrija rožnice

Polumjer zakrivljenosti rožice manji je nego kod bjeloočnice. Na vanjskoj površini iznosi u prosjeku 7,86 mm sa standardnom devijacijom od 0,26 mm, a na unutarnjoj površini je 6,7 mm [1]. Promjer rožnice na mjestu spoja s bjeloočnicom varira između 11 i 12 mm. Debljina središnjeg dijela rožnice iznosi u prosjeku 0,52 mm sa standardnom devijacijom od 0,04 mm, a perifernog 0,65 mm (pa do 1,0 mm) [1].

5.1.3. Građa rožnice

Rožnica se sastoji od šest slojeva: epitela, Bowmanove vanjske granične membrane, strome, Dua sloja, Descemetove unutarnje granične membrane te endotela prednje očne sobice. Slojevita struktura prikazana je na slici 7.



Slika 7. Slojevi rožnice

5.1.3.1. Rožnički epitel

Rožnički epitel je vanjski sloj rožnice debljine 50-90 μm [7]. Sastoji se od šest slojeva brzorastućih stanica koje se lako regeneriraju. Vlažnost stanica se održava suzama. Vanjski slojevi epitela se konstantno ljušte i nadomještaju novim stanicama koje nastaju u bazalnom sloju. Od velike je važnosti da površina epitela uvijek bude glatka kako bi se održala refraktivna svojstva oka.

5.1.3.2. Bowmanova membrana

Bowmanova granična membrana je čvrst i žilav sloj debljine 8-14 μm građen od gusto isprepletenih kolagenskih fibrila tipa I, a ima ulogu zaštite strome [7]. Bowmanova membrana je specifična za primata, dok je kod ostalih vrsta nepostojeća ili vrlo tanka.

5.1.3.3. Stroma

Stroma je najdeblji sloj rožnice (500 μm) i čini oko 90% ukupne debljine rožnice [7]. Sastoji se od oko 300-500 slojeva lamela naslaganih jedna na drugu, debljine oko 1,5 do 2,5 μm i širine oko 2 do 3 μm [1]. Lamelle su paralelne s površinom rožnice i dobro vidljive pod elektronskim mikroskopom. Lamelle se sastoje od paralelnih snopova kolagenskih fibrila tipa I, a manjim količinama i od tipova III, V i VI [7]. Promjer kolagenskih fibrila rožnice iznosi oko 25 μm i ne razlikuje se bitno prema slojevima i lamelama [1]. Upravo ovako dobra organiziranost i pravilnost kolagenskih fibrila se smatra glavnim uzrokom prozirnosti rožnice [8]. Promjer vlakana je dvadeset puta manji od prosječne valne duljine vidljive svjetlosti [8].

5.1.3.4. Dua sloj

28. svibnja 2013. objavljeno je otkriće dotada nepoznatog sloja rožnice. Dua sloj je iznimno čvrst kolagenski sloj debljine $10.15 \pm 3.6 \mu\text{m}$, sposoban podnijeti tlak od 200 kPa [9]. Nalazi se između strome i Descemetove membrane, a ime je dobio po Harminderu S. Dua, oftalmologu sa Sveučilišta u Nottinghamu u Ujedinjenom Kraljevstvu.

Dua i njegov istraživački tim radili su ispitivanja na 31 uzorku rožnica. Uzorci su napravljeni od očiju donora prosječne dobi 77,7 godina. Novi sloj izoliran je od ostatka rožnice tehnikom razdvajanja ubrizgavanjem sitnih mjehurića zraka u rožnicu, a otkriće je kasnije potvrđeno snimkama elektronskim mikroskopom. U slučaju da je zaista otkriven novi sloj rožnice, on bi trebao biti prisutan i kod djece, a to je istraživanje koje se tek treba provesti.

Otkriće i daljna istraživanja Dua sloja će bitno utjecati na kirurške zahvate na rožnici, kao i na razumijevanje biomehanike rožnice i liječenje nekih bolesti. Činjenica da je Dua sloj čvrst i građen primarno od kolagena omogućit će kirurzima da prilikom zahvata transplantacije ubrizgavaju zrak bliže Dua sloju umjesto u slojeve koji su podložni kidanju.

5.1.3.5. Descemetova membrana

Ispod Dua sloja nalazi se Descemetova membrana. To je sloj debljine 3-4 μm građen od kolagenskih fibrila tipa IV organiziranih u specifičnu heksagonalnu formu [7]. Fibrili tipa IV imaju manju čvrstoću od kolagena tipa I.

5.1.3.6. Rožnički endotel

Endotel je jednostavni sloj debljine 5 μm , građen od mitohondrijski bogatih stanica [7]. Endotel je odgovoran za transport tekućine preko stražnje površine rožnice i aktivno održava rožnicu u blagom stanju dehidracije kako bi se očuvala prozirnost. Za razliku od rožničkog epitela, endotel se ne regenerira. Umjesto toga, stanice se rastežu kako bi nadomjestile umrle stanice. Ovo utječe na staničnu gustoću i regulaciju tekućine. Ako endotel ne može održati odgovarajuću ravnotežu tekućine, doći će do otjecanja strome uslijed čega stroma može izgubiti svoju prozirnost.

5.2. Bjeloočnica

5.2.1. Funkcija

Bjeloočnica formira glavni zaštitni sloj oka. Njene funkcije su višestruke, ali najznačajnija je ona zaštite intraokularnih komponenti od ozljede i pomaka, opirući se istovremeno intraokularnom tlaku. Osigurava krutu bazu za hvatišta vanjskih očnih mišića i akomodativnog aparata i služi kao vodič za krvne žile i živčana vlakna koja povezuju prednju i stražnju stranu očne jabučice. Bjeloočnica omogućava pomicanje oka uz minimalnu promjenu očnog oblika i vrijednosti intraokularnog tlaka, a njena neprozirnost sprječava smanjivanje intenziteta svjetlosti koja pada na mrežnicu.

Ljudske oči su jedinstvene iz razloga što je bjeloočnica lako vidljiva dok su oči otvorene, ne samo zato što je bjeloočnica bijele boje, već i zbog činjenice da je ljudska šarenica relativno mala i zauzima puno manji dio vidljive površine oka nego kod životinja. Smatra se da je ovo evolucijska prilagodba koja omogućuje ljudima bolju međusobnu neverbalnu komunikaciju. Znanstvenici koji se bave proučavanjem životinja su uočili da su psi za vrijeme dresiranja razvili sposobnost primati naredbe gledajući u pokrete ljudskih očiju. Psi međusobno ne koriste ovakav oblik neverbalne komunikacije već vizualnu informaciju traže samo od ljudskih očiju.

5.2.2. Geometrija bjeloočnice

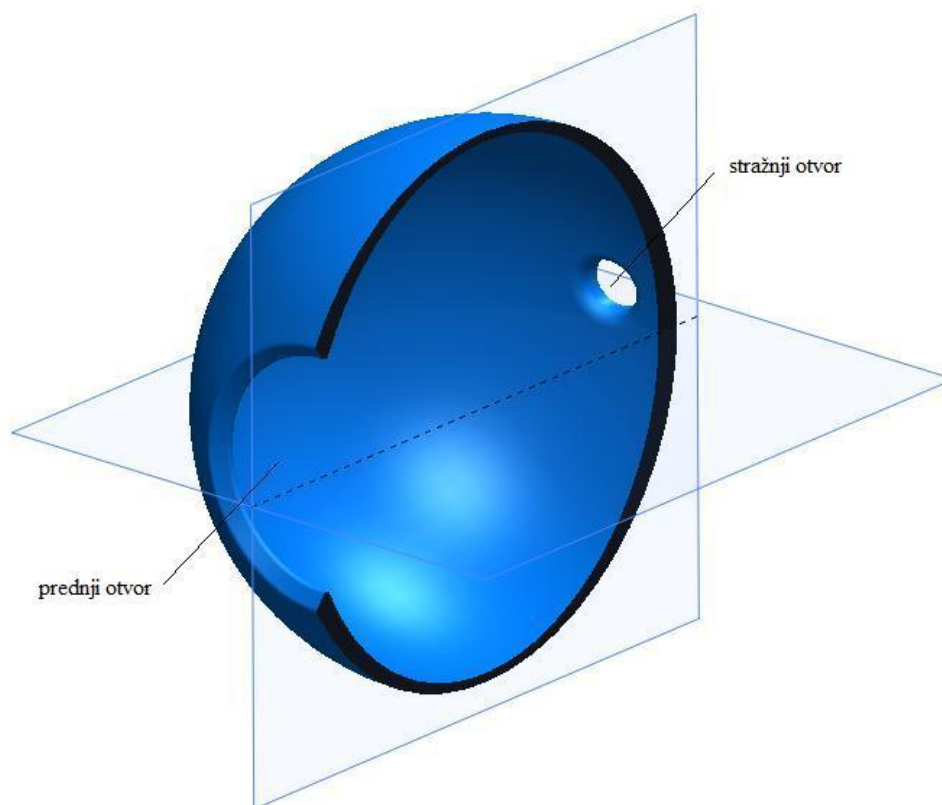
Bjeloočnica i rožnica spojene su prstenom koji se zove limbus. Bjeloočnica čini otprilike pet šestina površine vanjske fibrozne ovojnice oka i proteže se od limbusa sve do očnog živca. Veličina sfere bjeloočnice varira kod odraslih ljudi, ali prosječan promjer iznosi 23 mm [10]. Debljina bjeloočnice iznosi otprilike 1 mm u stražnjem dijelu u blizini vidnog živca i stanjuje se do 0,6 mm na ekvatoru [11]. Najmanja debljina je 0,3 mm, a nalazi se na mjestima neposredno iza ulaznih mjesta očnih mišića i postupno se zadebljava do 0,8 mm na mjestu spoja s rožnicom [12].

Udaljenosti između mjesta spoja vanjskih očnih mišića i limbusa variraju; srednji mišić se spaja sa bjeloočnicom na 5,5 mm, bočni na 6,9 mm, gornji na 7,7 mm i donji na 6,5 mm. Spojevi s gornjim i donjim kosim mišićem se nalaze iza ekvatora [10].



Slika 8. Vanjski očni mišići [13]

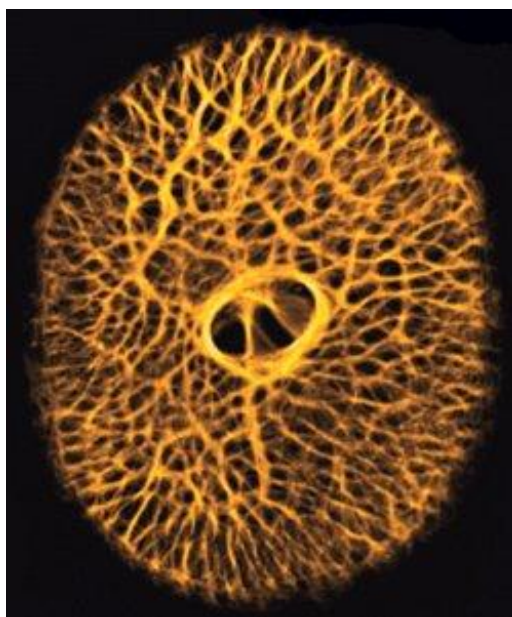
Bjeloočnica ima dvije velike perforacije: prednji otvor na čijem se mjestu nalazi spoj bjeloočnice i rožnice i stražnji otvor koji omogućava prolaz vidnog živca. Stražnji otvor nalazi se 3 mm bočno od središnje ravnine prema unutarnoj strani glave i 1 mm iznad horizontalnog meridijana. Prednji i stražnji otvor prikazani su na slici 9.



Slika 9. Prednji i stražnji otvor bjeloočnice lijevog oka

Na mjestu glave vidnog živca je mrežasta struktura *lamina cribrosa* građena od umreženih vlakana elastina i kolagena. *Lamina cribrosa* formira dno optičkog diska na unutarnjoj površini glave oćnog živca. Na vanjskoj površini glave oćnog živca, stražnji dio *lamine cribrose* je orijentiran prema prednjoj strani oćnog živca. *Lamine cribrosa* omogućava aksonima ganglijskih stanica mrežnice i centralnoj mrežnićkoj veni izlazak iz oka, a centralnoj mrežnićkoj arteriji ulazak u intraokularni prostor. *Lamina cribrosa* stabilizira intraokularni tlak formirajući barijeru između intraokularnog i ekstraokularnog prostora. Zbog svoje barijerne funkcije, sprječava istjecanje oćne vodice iz unutarnjeg prostora oka u prostor iza oćne jabučice. Budući da je intraokularni tlak nešto veći od tlaka u prostoru iza oćne jabučice, preko poprećnog presjeka *lamine cribrose* postoji odrećeni gradijent tlaka koji je jednak razilici između intraokularnog tlaka i tlaka cerebrospinalne tekućine u prostoru iza oćne jabučice. Ovakav gradijent tlaka ima za posljedicu blago ispupćenje *lamine cribrose* prema van. Gradijent ima utjecaj u nastanku oćnih bolesti kada je tlak na jednoj ili obje strane abnormalno visok ili abnormalno nizak.

Budući da je *lamina cribrosa* u pogledu čvrstoće najslabija komponenta na površini bjeloočnice, puno je osjetljivija na promjene u intraokularnom tlaku i lako se deformira. Pretpostavlja se da je njena deformacija u stražnjem smjeru uzrok oštećenja vidnog živca uslijed povišenog intraokularnog tlaka jer dolazi do pritiska na očni živac i krvne žile.



Slika 10. *Lamina cribrosa* pod skenirajućim elektronskim mikroskopom [14]

Bjeloočnica je perforirana trima grupama manjih kanala koji se prema lokaciji mogu podijeliti na prednje, srednje i stražnje. Svrha ovih kanala je omogućavanje prolaza živcima i krvnim žilama. Prednji otvori nalaze se blizu hvatišta vanjskih očnih mišića i formiraju rutu za prednje cilijarne arterije i vene, i cilijarne živce. Srednji otvori nalaze se iza ocnog ekvatora i omogućavaju izlazni put vrtložnim venama. Stražnji otvori nalaze se u blizini glave vidnog živca i omogućavaju prolaz dugim i kratkim cilijarnim živcima i krvnim žilama. Kratki cilijarni živci povezani su sa stražnjim dijelovima bjeloočnice, a dugi živci s prednjim dijelovima.

5.2.3. Građa bjeloočnice

Bjeloočnica se sastoji od tri sloja: episklera, bjeloočnička stroma i *lamina fusca*.

5.2.3.1 Episklera

Episklera je vanjski sloj bjeloočnice koji je u kontaktu s Tenonovom kapsulom i spojnicom (konjunktivom). Tenonova kapsula je tanka membrana koja obavija očnu jabučicu od očnog živca do limbusa i formira glatku čašicu unutar koje se oko pomiće. Episklera je dobro prokrvljena pomoću prednjih cilijarnih arterija, a građena je od nasumično povezanih kolagenskih fibrila.

5.2.3.2. Stroma

Stroma je građena od nepravilno organiziranih kolagenskih fibrila i vlakana elastina. Pretpostavlja se da je ovakva nepravilna organiziranost glavni uzrok neprozirnosti bjeloočnice [8].

5.2.3.3 Lamina fusca

Lamina fusca je pigmentirano tkivo koje se nalazi između bjeloočnice i žilnice, a pričvršćeno je za žilnicu kolagenskim vlaknima manje čvrstoće. *Lamina fusca* je građena od manjih tanjih kolagenskih vlakana nego stroma, ali ima puno veću gustoću elastinskih vlakana [15].

5.2.4. Strukturalna organizacija bjeloočnice

Bjeloočnica se sastoji od umreženih kolagenskih vlakana, manje količine elastinskih vlakana, nekolicine fibroblasta i umjerene količine vanstaničnog matriksa. Mjerenjima je utvrđeno da kolagen čini 50% mase bjeloočnice. U najvećoj mjeri je to kolagen tipa I [16]. Sadržaj kolagena je u stražnjem dijelu bjeloočnice veći nego u srednjem i prednjem dijelu [2]. Osim kolagena tipa I, u bjeloočnici su pronađene i manje količine kolagena tipova III, IV, V, VI, VIII, XII i XIII [17], a distribucija ovih vlakana je varijabilna po regijama bjeloočnice [18].

Bjeloočnica ima puno veću varijabilnost promjera kolagenskih vlakana za razliku od rožnice. Raspon iznosi 25-300 nm, a organiziranost vlakana je također puno nepravilnija nego u rožnici. Promjeri snopova vlakana variraju između 0,5 i 6 µm ovisno o njihovoj lokaciji; na vanjskoj strani su tanji nego na unutarnjoj [11]. Distribucija snopova također varira. Lamelarna organizacija na vanjskim slojevima se progresivno pretvara u nepravilan uzorak na unutarnjim slojevima [19].

Veličine i oblici kolagenskih snopova variraju i po geografskoj lokaciji na bjeloočnici; na prednjoj strani su snopovi manji i umjereno kompaktni, na ekvatoru su tanji i mnogo gušći, a na stražnjoj strani su veći i nepravilno organizirani [20].

Orijentacija kolagenskih snopova također pokazuje regionalnu varijabilnost; u pravilu su vlakna orijentirana u cirkularnom smjeru, ali u prednjem dijelu bjeloočnice vlakna propinaju meridijalnu orijentaciju [21].

Osim regionalne varijabilnosti kolagenskih snopova na bjeloočnici, kolagenski fibrili također mijenjaju svoju orijentaciju unutar pojedinog snopa ovisno o geografskoj lokaciji [22] i dubini sloja.

5.2.4.1 Proteoglikani

Proteoglikani su nekolagenski modulatori u vanstaničnom matriksu koji koordiniraju sintezu kolagena, orijentaciju i hidrataciju tkiva. Koncentracija proteoglikana u bjeloočnici je manja nego u rožnici [23]. Proteoglikani su kompleksne molekule koje se sastoje od jezgrenog proteina varijabilne duljine koji je kovalentno vezan za bočne lance glikoaminoglikana. Glikoaminoglikani su dugolančane nerazgranate molekule polisaharida. Proteoglikani su hidrofilni zbog svog negativnog naboja, a hidrofilnost utječe na hidrataciju i elastičnost bjeloočnice. Sadržaj vode u bjeloočnici je otprilike 70%, a stražnji dio bjeloočnice ima veću hidrataciju nego prednji [24].

Proteoglikani se mogu kategorizirati prema veličini i prisutnosti nekoliko karakterističnih regija unutar njihovih jezgrenih proteina; agrekan je primjer velikog proteoglikana. Agrekan se u velikim količinama nalazi u stražnjem dijelu bjeloočnice što je vjerojatno povezano s velikom deformabilnošću bjeloočnice na tom dijelu [25].

5.2.4.2. Elastinska vlakna

Bjeloočnica ima mali postotak (2% suhe mase) elastina [26], ali ovaj strukturni element ima važnu ulogu u vanstaničnom matriksu. Najviše elastinskih vlakana nalazi se u *lamini fusci* i unutarnjim slojevima strome i uzduž trajektorija naprezanja vanjskih očnih mišića. Distribucija elastina pokazuje regionalnu varijabilnost; lokalizirani su uz ekvator, limbus i optički disk [19]. Elastin pridonosi viskoelastičnom ponašanju bjeloočnice i apsorpiranju energije prilikom naprezanja.

5.2.4.3. Fibroblasti

Bjeloočni fibroblasti nalaze se između kolagenskih snopova. Fibroblasti su sposobni sintetizirati sve komponente vanstaničnog matriksa, stoga je njihova biološka aktivnost ključna u održavanju strukture i funkcije bjeloočnice.

5.2.4.4. Ostale komponente

Ostale komponente koje vrijedi navesti su glikoproteini i enzim za degradaciju matriksa. Glikoprotein ima ulogu veziva za molekule u vanstaničnom matriksu [11]. Metaloproteinaze su grupe enzima koje razgrađuju kolagen i ostale elemente u matriksu, a njihovo djelovanje regulirano je inhibitorima.

5.3. Kratka usporedba strukture rožnice i bjeloočnice

Oba tkiva su bez krvnih žila i sastoje se uglavnom od kolagena i nekolicine tipova stanica. Međutim, detaljnija analiza ističe vrlo jasne razlike. Kolagenski fibrili u rožnici su jednolikog promjera za razliku od velikog raspona promjera fibrila u bjeloočnici. Fibrili u rožnici su jednoliko razmaknuti i imaju pravilnu slojevit organizaciju. Bjeloočnica također ima lamelarnu strukturu, ali ona nije toliko uočljiva zbog mrežaste i nepravilne organizacije fibrila. Upravo je ovakva strukturna razlika odgovorna za prozirnost rožnice i neprozirnost bjeloočnice.

Razlike postoje i u organizaciji nekolagenskih komponenti i kompozicije vanstaničnog matriksa. Fibroblasti u rožnici su paralelni s površinom rožnice, dok su u bjeloočnici slabije organizirani.

Rožnica ima veći sadržaj vanstaničnog matriksa i nešto veći sadržaj vode od bjeloočnice (78% rožnica i 70% bjeloočnica) [10].

Prozirna rožnica ima refraktivnu ulogu, a bjeloočnica je puno čvršće tkivo odgovorno za očuvanje oblika očne jabučice i zaštitu očnih komponenti.

6. BIOMEHANIČKA ANALIZA VANJSKE OVOJNICE OKA

Oko je biomehanički sustav tankih ljusaka. Vanjska fibrozna ovojnica mora pružati otpor unutarnjem očnom tlaku, pružiti potporu za zaštitu unutarnje strukture oka, dati hvatište za vanjske očne mišiće i očuvati stalan oblik i dimenzije oka kako bi se omogućila njegova normalna funkcija.

6.1. Mehanička svojstva rožnice

Budući da stroma, zajedno s Bowmanovom membranom, čini više od 90% debljine rožnice, logično je smatrati da elastična svojstva rožnice u tangencijalnoj ravnini ovise pretežno o stromi i Bowmanovoj graničnoj membrani.

Bowmanova granična membrana zgusnuti je dio strome. Kolagenska vlakna su gušće isprepletena u zoni periferne trećine debljine strome, u kojoj je veća koncentracija manje hidrofilnog proteoglikana keratin sulfata, nego u dvjema zadnjim trećinama s većom koncentracijom tog hidrofilnog protoglikana. U području prednje trećine strome također je veća koncentracija manje hidrofilnog dermatan sulfata. To prednju trećinu strome čini bitnom u održavanju zakrivljenosti rožnice. Youngov modul elastičnosti kolagenskih fibrila iznosi oko 1,0 GPa [2], a kako su oni uloženi u osnovnu supstancu, modul smicanja iznosi oko 10^{-5} GPa [2]. Struktura i debljina rožnice njezine su unutarnje biomehaničke značajke.

Stroma rožnice sastoji se od oko 200 tankih lamela, svaka debljine 2 μm , a sastavljena je od međusobno paralelnih vlakana kolagena debljine 20 do 33 nm. Pri fiziološkom intraokularnom tlaku tangenti modul elastičnosti za rožnicu iznosi $E_{ij} = 17 \cdot 10^3$ kPa [2].

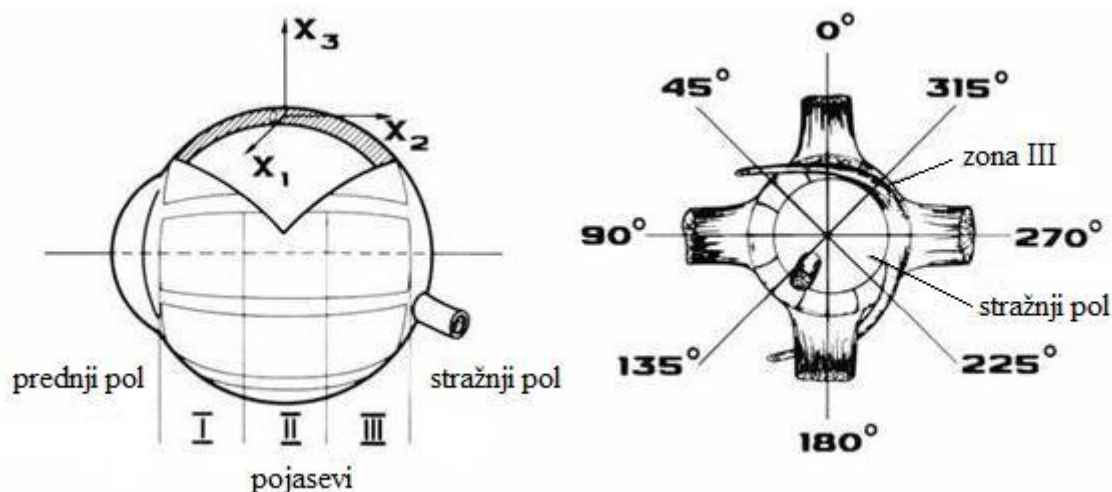
Promjena refrakcije i zakrivljenosti rožnice nastaju pri rezanju i prilikom laserskih i drugih zahvata za korekciju refrakcije. Pri tome se može promijeniti polumjer zakrivljenosti prednje ili stražnje plohe, ili indeks loma rožnice. Kod kirurškog zahvata, kada se prekidaju pojedine lamele, dolazi do promjene debljine rožnice i preraspodjele opterećenja na preostale lamele što ima za posljedicu promjenu tangencijalnih naprezanja, deformacija, zakrivljenosti i refrakcije. Nakon kirurških zahvata na horizontalnim bulbomotornim mišićima, nastaju promjene u zakrivljenosti između horizontalnog i vertikalnog meridijana rožnice što dovodi do promjene u korekciji astigmatizma.

6.2. Mehanička svojstva bjeloočnice

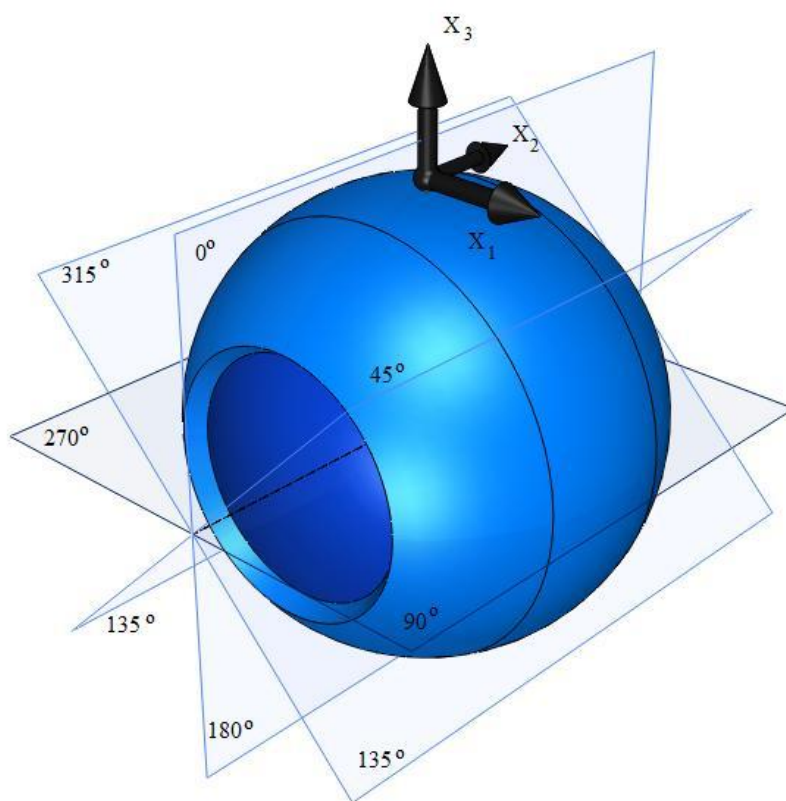
Niz podataka o biomehaničkim svojstvima fibrozne ovojnice i o utjecaju očnih mišića na mehanička svojstva bjeloočnice daju Saulgozis i Volkolakova (1977., 1983.) [2]. Oni su mjerili niz anatomske i biomehaničke parametara *in vivo* i *in vitro* primjenom ultrazvuka te ispitivanjem uzoraka na vlak uz određivanje modula elastičnosti i deformabilnosti te anizotropiju i nejednakost u mehanokemijskim i strukturnim svojstvima bjeloočnice.

Uzorci za ispitivanje napravljeni su od bjeloočnica 12 muških i ženskih žrtava prometnih nesreća, dobi 24-45 godina. Broj uzoraka bio je 108. Na osnovu podataka iz medicinskih kartona i od rodbine, uzorci zdravih očiju podijeljeni su u dvije skupine. Prva skupina uzoraka potjecala je od bjeloočnica ljudi koji su se tijekom života bavili poslom koji je zahtijevao napor gledanja na blizinu. Druga skupina uzoraka potjecala je od ljudi koji nisu imali takav napor.

Da bi se dobila adekvatna prostorna orijentacija na bjeloočnici, postavljen je desni pravokutni koordinatni sustav s ishodištem u najvišoj točki oka (Slika 11). Os X_1 usmjerena je tangencijalno uz ekvator, os X_2 u meridijalnom smjeru, a os X_3 u smjeru debljine bjeloočnice. U meridijalnom smjeru oko je podijeljeno u tri jednako široka pojasa (I-prednji; II-srednji; III-stražnji). Uzduž ekvatora oko je podijeljeno u 8 zona s razmakom od 45° . Zone 0° , 90° , 180° i 270° nalaze se na meridijanima hvatišta vanjskih očnih mišića. Slika 12 prikazuje navedeni koordinatni sustav na desnom oku.



Slika 11. Koordinatni sustav na bjeloočnici [2]



Slika 12. Koordinatni sustav na bjeloočnici u trodimenzionalnom prikazu

Brzina prolaska ultrazvuka kroz debljinu bjeloočnice c_{33} (u smjeru osi X_3) mjerena je pri frekvenciji 1,670 kHz. Ispitivanja vlačnom silom provedena su u tangencijalnim smjerovima (osi X_1 i X_2) pri temperaturi 36°C i 42°C, pri čemu je računat tangencijalni modul elastičnosti E_2 .

Budući da je debljina bjeloočnice vrlo mala (0,3-1,4 mm), nije bilo moguće mjeriti mehanička svojstva u radijalnom smjeru klasičnim vlačnim testom. Iz tog razloga nužno je bilo koristiti se indirektnim metodama, kao što je mjerenje ultrazvukom. Eksperimentalno je utvrđeno da brzina zvuka u ljudskoj bjeloočnici iznosi 1613 m/s pri temperaturi od 20°C. Ako se u obzir uzme temperaturni koeficijent brzine ultrazvuka u bjeloočnici od 1 m°C/s, onda brzina zvuka u bjeloočnici pri 37°C iznosi 1640 m/s. Budući da je stijenka oka vrlo tanka, vrlo je teško direktno mjeriti brzinu ultrazvuka u njoj. Indirektna metoda sastojala se od usmjeravanja ultrazvuka u pravcu vertikalne osi kroz očnu jabučicu. U tom slučaju, zraka ultrazvuka prolazi kroz staklasto tijelo i dva puta kroz stijenku očne jabučice. Znajući brzinu ultrazvuka kroz staklovinu (1534 m/s) i debljinu stijenke oka, moguće je izračunati brzinu utrazvuka kroz

stijenku. Brzina ultrazvuka u stijenci najviše ovisi o brzini ultrazvuka u bjeloočnici, jer bjeloočnica čini 80% debljine stijenke, a ostalih 20% čine mrežnica i žilnica.

Ultrazvučnim ispitivanjem dobila se topografska raspodjela brzine ultrazvuka u bjeloočnici. Rezultati pokazuju da brzina ultrazvuka naglo pada u smjeru uzdužne osi, što vrijedi i za modul elastičnosti E_2 . Kvocijent vlačnih deformacija $\varepsilon_{22}/\varepsilon_{11}$ između dvaju smjerova iznosio je u pojasu I 0,9, u pojasu II 1,2, u pojasu III 1,25, dok je u području stražnjeg pola deformacija u oba smjera bila jednaka, a kvocijent je iznosio 1,0. I akustična i mehanička ispitivanja pokazala su nejednoliku krutost tkiva unaokolo zona bjeloočnice. Najmanja debljina bjeloočnice i najviše vrijednosti c_{33} i E_2 u području pojasa II nađene su u području zona $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ i 270° , što odgovara mjestima gdje se nalaze hvatišta svih četiriju ravnih mišića koji pomiču očnu jabučicu. Prosječni modul elastičnosti bjeloočnice pri normalnom intraokularnom tlaku iznosi $E = 12,2 \cdot 10^3$ kPa [2].

Deformabilnost bjeloočnice nije jednaka u svim dijelovima prednjeg segmenta upravo zbog hvatišta i djelovanja ravnih mišića. Ona je mnogo manja u segmentima oka na $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ i 270° , dakle na mjestima hvatišta tetiva mišića. Kod osoba koje su naprezale oči pri radu na blizinu, deformacija ε_{22} je bila mnogo manja u području hvatišta ravnih mišića, što se tumači ojačanjem u smislu funkcionalne prilagodbe mišića i tetiva [2].

Mehanička svojstva rožnice i bjeloočnice ovise i o drugim sastavnim dijelovima strukture kao što su nekolageni protini, voda i glikoproteini.

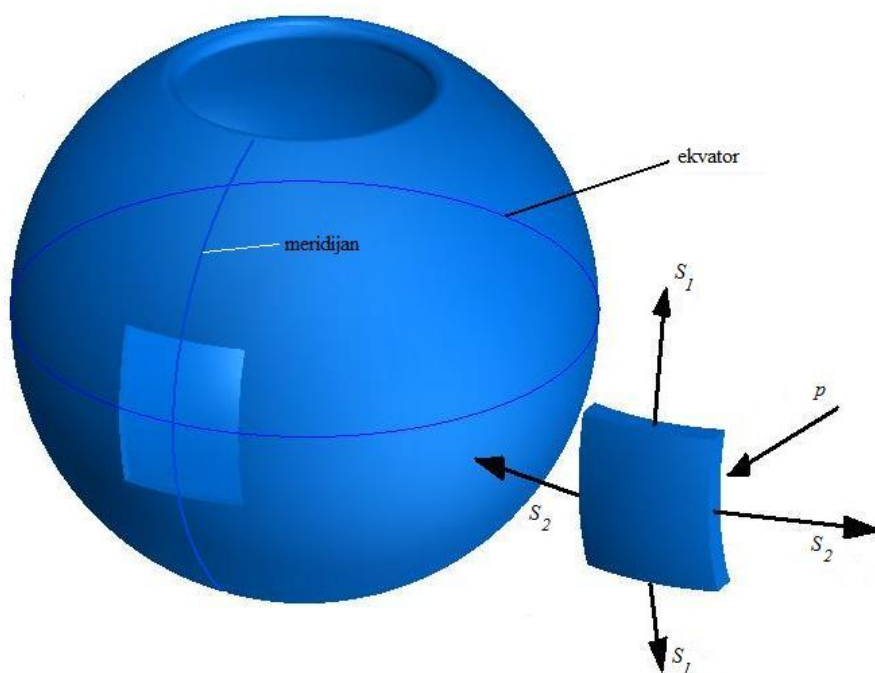
Ana Jo-Osvatić i suradnici (1976.) [1] analizirali su tri serije bolesnika u dobi 5 do 14 godina sa strabizmom. U prvoj skupini strabizam je korigiran pomicanjem tetive vanjskog ravnog ocnog mišića prema naprijed, čime se postiglo povećanje vlačnog opterećenja. U drugoj je skupini, osim pomicanja vanjskog mišića prema naprijed, izvršeno pomicanje medijalnog ravnog mišića oka prema nazad. U tih je pacijenata uz povećan vlak u lateralnom smjeru, smanjen vlak prema sredini. U trećoj je skupini izvršeno pomicanje prema nazad ili produljenje tetive medijalnog ravnog mišića, čime je smanjen vlak s medijalne strane, a time i njegovo djelovanje na čitav prednji segment oka u horizontalnoj ravnini. Razlika u zakrivljenosti rožnice između horizontalnog i vertikalnog meridijana rožnice mjerena je oftalmometrom po Javalu prije operacije, te 8 ili 10 dana, tri tjedna i tri mjeseca nakon kirurškog zahvata.

Najveća razlika u zakrivljenosti rožnice između prijeoperativnih i poslijeoperativnih vrijednosti zapažena je 8 do 10 dana nakon operacije, dok se u kasnijim kontrolama smanjivala. Te su se razlike najčešće kretale između dioptrije +1,5 i -1, a zabilježene su i ekstremne vrijednosti razlike koje su iznosile i do dioptrije 4. Razlika između zakrivljenosti vertikalnog i horizontalnog meridijana nastaje zbog razlike u vlačnom opterećenju ravnih mišića u horizontalnom i vertikalnom smjeru prije i poslije korektivnog zahvata.

6.3. Primjena teorije ljusaka

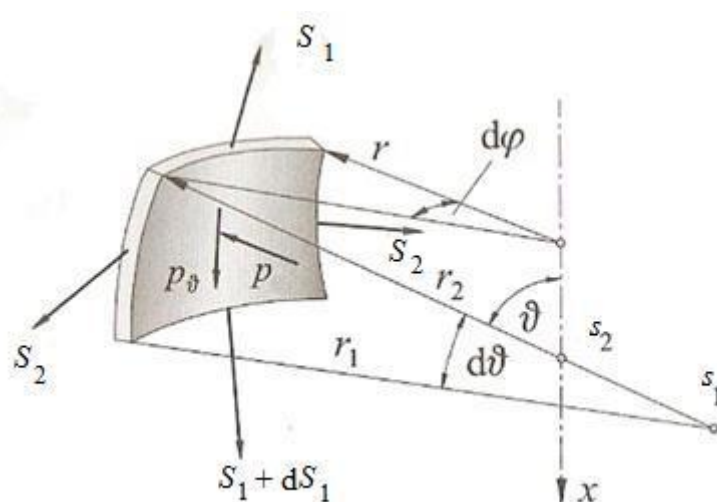
6.3.1. Membranska naprezanja u bjeloočnici

Djelovanje mehaničkih sila na stijenke očne jabučice može se objasniti teorijom tankih ljusaka prema kojoj se u inženjerskoj praksi proračunavaju rezervoari za kapljevine ili plinove. Na stijenke rezervoara djeluju sile kao rezultat razlike između unutarnjeg i vanjskog tlaka pri čemu je unutarnji tlak redovito veći, što je slučaj i s očnom jabučicom. Posebni su tip rezervoara rotacijsko simetrične ljuske koje nastaju rotacijom zakrivljene ili ravne crte oko simetrične osi. Ako se zanemare male asimetrije, očna jabučica se može usporediti s takvim rezervoarom, pa se sile u bjeloočnici i rožnici mogu približno odrediti prema zakonima za takve rotacijske ljuske. Bjeloočnica je membrana koja preuzima unutarnji tlak očne jabučice p koji u prosjeku iznosi 2,67 kPa. Očna se jabučica zapravo sastoji od dva spojena kuglasta segmenta različitih polumjera. Iako su sile unutarnjeg tlaka u oku relativno malene, one moraju odgovarati zakonima mehanike. Slika 13 prikazuje membranske sile u bjeloočnici kao rotacijski simetričnoj ljusci gdje sila S_1 predstavlja silu u smjeru meridijana, sila S_2 je sila u smjeru paralele (cirkularna sila), a p je intraokularni tlak.



Slika 13. membranske sile u bjeloočnici

Membranske sile u bjeloočnici kao osnosimetričnoj ljusci izračunavaju se iz uvjeta ravnoteže na diferencijalnom elementu ljuske (slika 14).



Slika 14. Ravnoteža diferencijalnog elementa ljuske [27]

Pri postavljanju uvjeta ravnoteže jedine nepoznanice su sile S_1 i S_2 . Za element se mogu postaviti dva nezavisna uvjeta ravnoteže te je problem statički određen. Iz tog razloga nije potrebno uvoditi pretpostavke o deformiranju ili pretpostavke o raspodjeli naprezanja.

Sile S_1 i S_2 odnose se na jedinicu duljine stoga se moraju množiti s duljinom stranice elementa na kojoj djeluju pri postavljanju uvjeta ravnoteže [27].

Sile $S_1 r d\varphi$ i $(S_1 + dS_1)(r + dr)d\varphi$ čine s normalom e_n kut $d\varphi/2$, pa zbroj njihovih projekcija na pravac normale iznosi:

$$-S_1 r d\varphi \sin \frac{d\vartheta}{2} - (S_1 + dS_1)(r + dr)d\varphi \sin \frac{d\vartheta}{2} = -S_1 r d\varphi d\vartheta \quad (1)$$

pri čemu su zanemarene male veličine višeg reda. Budući da je $d\vartheta$ infinitezimalno mali kut vrijedi da je $\sin d\vartheta/2 = d\vartheta/2$.

Projekcije cirkularnih sila $S_2 r_1 d\vartheta$ na radijalan pravac tvore rezultantu:

$$-S_2 r_1 d\vartheta \sin d\vartheta/2 = -S_2 r_1 d\vartheta d\varphi \quad (2)$$

Ako se rezultanta na radijalnom pravcu projicira na pravac normale dobiva se:

$$-S_2 r_1 d\vartheta d\varphi \sin \vartheta \quad (3)$$

Tlak p_ϑ je okomit na normalu, pa ne doprinosi ravnoteži u smjeru normale. Tlak p projicira se u cijelosti u smjer normale. Njegova rezultanta je:

$$p r_1 d\vartheta r d\varphi \quad (4)$$

Uvjet ravnoteže u smjeru normale iznosi:

$$\sum F_n = -S_1 r d\varphi d\vartheta - S_2 r_1 d\vartheta d\varphi \sin \vartheta + p r_1 d\vartheta r d\varphi = 0 \quad (5)$$

Ako se gornji izraz podijeli s $r_1 r d\varphi d\vartheta$ i zatim sredi, dobiva se:

$$\frac{S_1}{r_1} + \frac{S_2}{r} \sin \vartheta = p \quad (6)$$

Ako u jednadžbu (6) uvrstimo $r = r_2 \sin \vartheta$, dobiva se:

$$\frac{S_1}{r_1} + \frac{S_2}{r_2} = p \quad (7)$$

Budući da se u proračunu bjeloočnica aproksimira kuglom, vrijedi:

$$r_1 = r_2 = R_B \quad (8)$$

gdje je R_B polumjer bjeloočnice.

Ako se (8) uvrsti u (7) dobiva se:

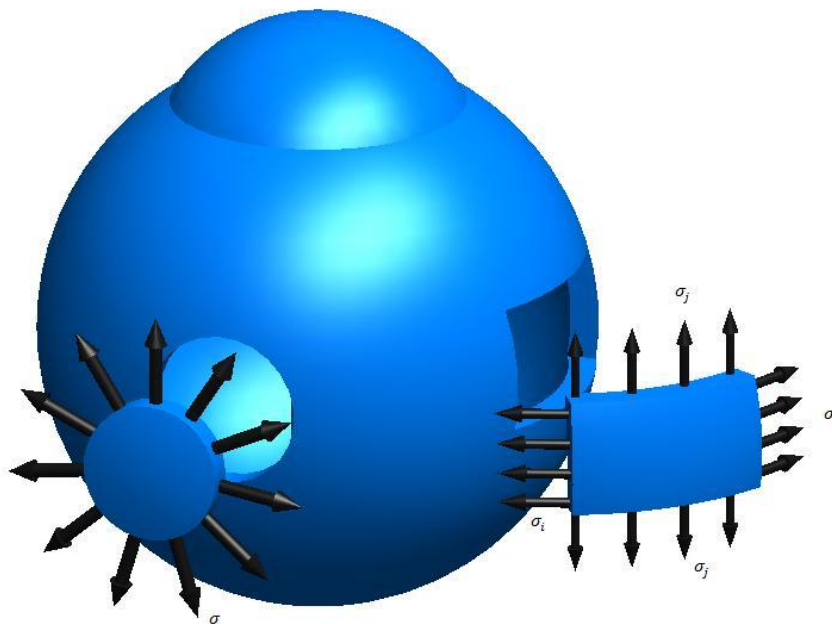
$$S_1 = S_2 = \frac{p \cdot R_B}{2} \quad (9)$$

Membransko naprezanje u bjeloočnici iznosi:

$$\sigma = p \cdot \frac{R_B}{2\delta} \quad (10)$$

gdje je σ membransko naprezanje, p je intraokularni tlak, R_B je polumjer bjeloočnice, a δ debljina stijenke bjeloočnice.

Zbog simetrije, meridijanska i cirkularna sila su jednake, te su i naprezanja jednaka. Bilo koji pravac se mogao odabrati kao os ljuske pa su naprezanja jednaka u smjerovima svih meridijana i paralela (slika 15).



Slika 15. Membranska naprezanja

Preuzimanje tih naprezanja u bjeloočnici i rožnici moguće je samo ako su njihova kolagenska vlakna u takvom rasporedu da omogućavaju izotropno ponašanje fibrozne ovojnice. Geometrijska analiza svojstava poprečnoga presjeka oka pokazuje da je debljina bjeloočnice i rožnice različita, ali s obzirom na strukturu i mehanička svojstva, razmjerna silama.

Pri analizi odnosa tlakova s unutarnje i vanjske strane bjeloočnice ne treba zanemariti vanjski, intraorbitalni tlak koji s vanjske strane pritiskuje bjeloočnicu i koji je rezultat napetosti orbitalnog tkiva i tonusa očnih mišića, te pritiska vjeđa na bulbus. Taj tlak nije zanemariv i iznosi $p_2 = 0,67 \text{ kPa}$ [2].

Također treba uzeti u obzir da tlak s unutarnje strane bjeloočnice nije jednak intraokularnom tlaku, jer na bjeloočnicu se naslanjaju žilnica i mrežnica, koje također preuzimaju dio naprezanja. Na bjeloočnicu će dakle s unutarnje strane djelovati tzv. suprakoroidalni tlak p_s , koji je manji od intraokularnog tlaka u staklastom tijelu p za oko $0,26 \text{ Pa}$ [2].

$$p_s = p - 0,26 \text{ kPa} = 2,41 \text{ kPa} \quad (11)$$

Uvrstimo li to u početnu jednadžbu, dobivamo:

$$\sigma = (p_s - p_2) \cdot \frac{R_B}{2\delta} \quad (12)$$

Maksimalno naprezanje javlja se na mjestu hvatišta vanjskih očnih mišića gdje je debljina stijenke najmanja. Bjeloočnica je najdeblja na stražnjoj strani u blizini oćnog živca te je na tom mjestu naprezanje najmanje. U poglavlju 5.2.2. navedena je vrijednost prosječnog promjera bjeloočnice i on iznosi 23 mm . Za vrijednost polumjera R_B uzet će se polovica prosječnog promjera, dakle $11,5 \text{ mm}$. Debljine bjeloočnice na pojedinim mjestima također su navedene u poglavlju 5.2.2..

Debljina bjeloočnice na mjestu hvatišta očnih mišića iznosi:

$$\delta_{hvat} = 0,3 \text{ mm} \quad (13)$$

Naprezanje bjeloočnice na mjestu hvatišta mišića:

$$\sigma_{hvat} = (p_s - p_2) \cdot \frac{R_B}{2\delta_{hvat}}$$

$$\sigma_{hvat} = (2410 \cdot 10^{-6} - 670 \cdot 10^{-6}) \cdot \frac{11,5}{2 \cdot 0,3}$$

$$\sigma_{hvat} = 0,03335 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (14)$$

Debljina bjeloočnice na stražnjem dijelu:

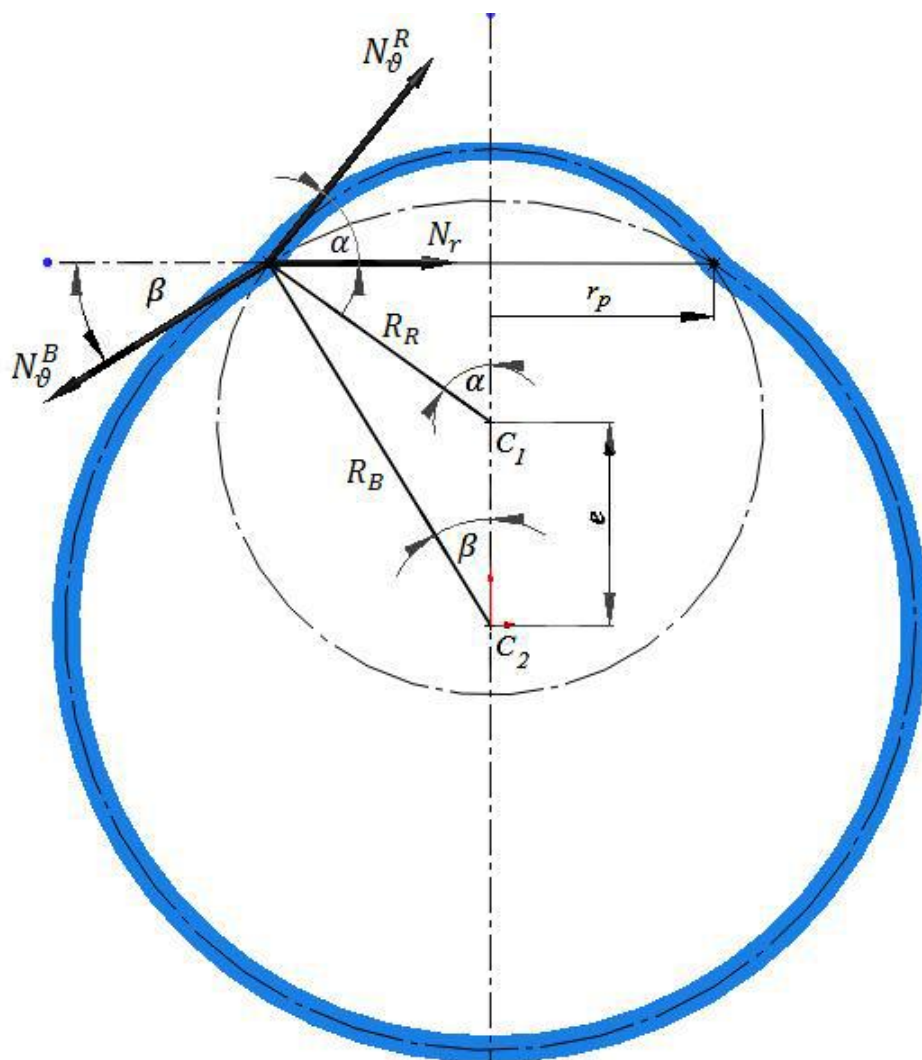
$$\delta_{str} = 1 \text{ mm} \quad (15)$$

Naprezanje bjeloočnice na stražnjem dijelu:

$$\sigma_{str} = (p_s - p_2) \cdot \frac{R_B}{2\delta_{str}}$$
$$\sigma_{str} = (2,41 \cdot 10^{-3} - 0,67 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{11,5}{2 \cdot 1}$$
$$\sigma_{str} = 0,010005 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (16)$$

6.3.2. Određivanje sile u prstenu na granici rožnice i bjeloočnice

Promjene polumjera zakrivljenosti na granici bjeloočnice i rožnice ne bi bile moguće bez funkcionalnog prstena koji preuzima razliku u projekciji sila u membranama. Upravo na toj granici nalazi se zadebljali limbus rožnice te hvatište cilijarnog mišića.



Slika 16. Sile u prstenu na spoju rožnice i bjeloočnice

N_{θ}^R i N_{θ}^B su sile u rožnici i bjeloočnici i iznose:

$$N_{\theta}^R = \frac{p \cdot R_R}{2} \quad (17)$$

$$N_{\theta}^B = \frac{p \cdot R_B}{2} \quad (18)$$

R_R i R_B su polumjeri rožnice i bjeloočnice na mjestu spoja tj. limbusa.

N_r je radijalno opterećenje prstena i dobiva se iz uvjeta ravnoteže:

$$-N_{\theta}^B \cdot \cos\beta + N_{\theta}^R \cdot \cos\alpha + N_r = 0 \quad (19)$$

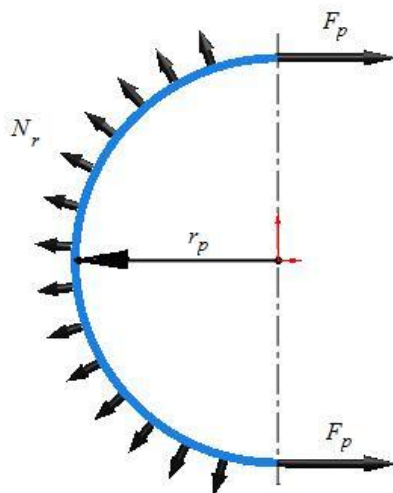
Uvrštavanjem (17) i (18) u (19) dobiva se:

$$-\frac{p \cdot R_B}{2} \cdot \cos\beta + \frac{p \cdot R_R}{2} \cdot \cos\alpha + N_r = 0 \quad (20)$$

$$N_r = \frac{p}{2} \cdot (R_B \cdot \cos\beta - R_R \cdot \cos\alpha) \quad (21)$$

Članovi u zagradi u jednadžbi (21) predstavljaju projekciju e polumjera R_B i R_R na uzdužnoj osi oka. Jednadžba (21) se može zapisati kao:

$$N_r = \frac{p}{2} \cdot e \quad (22)$$



Slika 17. Sile u prstenu

Kak bi se dobila sila u prstenu F_p (slika 17), potrebno je integrirati radijalnu silu:

$$2F_p = \int_0^{\pi} N_r \cdot r_p \cdot \sin\theta \cdot d\theta \quad (23)$$

N_r i r_p su konstantni pa se mogu izlučiti ispred integrala:

$$2F_p = \frac{p}{2} \cdot e \cdot r_p \int_0^{\pi} \sin\theta \cdot d\theta \quad (24)$$

$$2F_p = \frac{p}{2} \cdot e \cdot r_p \cdot [-\cos(\pi) + \cos(0)] \quad (25)$$

$$2F_p = \frac{p}{2} \cdot e \cdot r_p \cdot [1 + 1] \quad (26)$$

$$F_p = p \cdot e \cdot \frac{r_p}{2} \quad (27)$$

Pri čemu je F_p sila u prstenu, r_p je polumjer prstena, a p je intraokularni tlak. Iznos veličine e je naveden u poglavlju 3. i kod odrasle osobe iznosi prosječno 4,7 mm.

Prosječna vrijednost promjera rožnice tj. prstena na mjestu spoja s bjeloočnicom navedena je u poglavlju 5.1.2. iznosi 11.5 mm. Iz toga se dobije vrijednost polumjera prstena $r_p = 5,75$ mm.

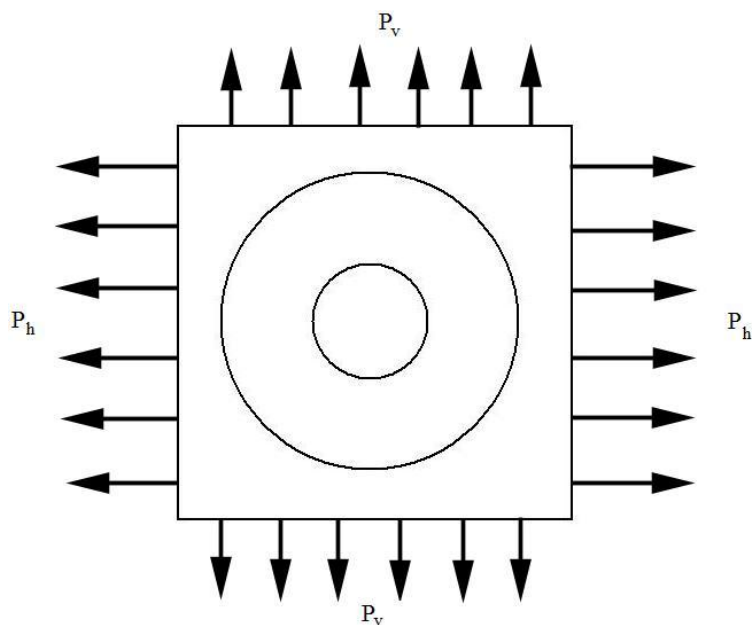
Uvrštavanjem zadanih vrijednosti u jednadžbu (27) dobiva se sila u prstenu:

$$F_p = 2,670 \cdot 10^{-3} \cdot 4,7 \cdot \frac{5,75}{2}$$
$$F_p = 0,036078 \text{ N} \quad (28)$$

Očni mišići osim vlaka imaju i postraničan pritisak na očnu jabučicu. Taj pritisak se za pojedini mišić razlikuje i ovisi o trenutnom položaju oka. Što je kut zakreta oka na određenu stranu veći, to će pri naknadnoj kontrakciji suprotnog ravnog mišića biti veći postranični pritisak na očnu jabučicu. Mišićna sila potrebna da vrati oko za jedan stupanj iznosi 4,9 mN, a pri povratu oka iz otklona za 40 stupnjeva sila u mišićima doseže čak 441 mN [2]. Sile koje ravni očni mišići razvijaju pri kontrakciji iznose [2]:

- gornji ravni mišić 2,08 N
- unutarnji ravni mišić 1,94 N
- donji ravni mišić 2,12 N
- vanjski ravni mišić 2,29 N

Istodobno opterećenje jednakim silama, što odgovara tonusu tih mišića, rezultira jednakim radijalnim opterećenjem. Mekani prsten mora pri tome poprimiti okrugli oblik (slika 18).

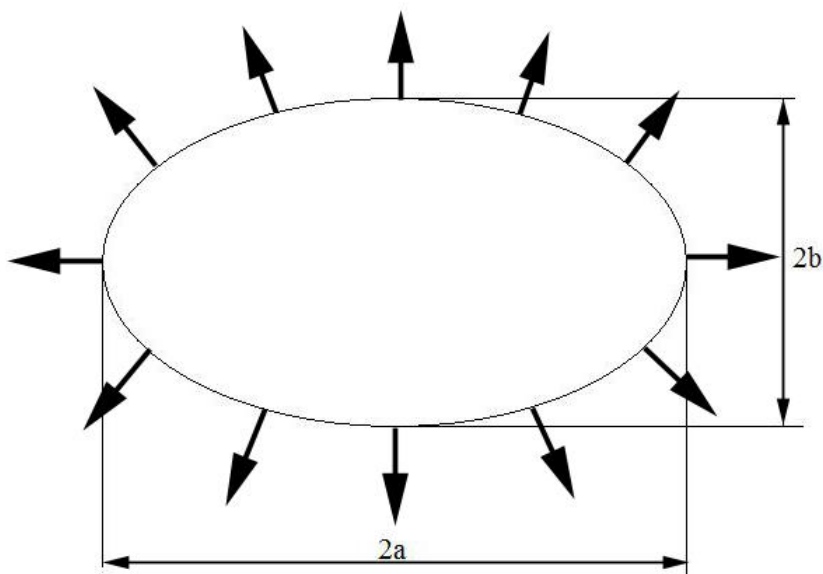


Slika 18. Ravnotežni položaj prstena

Ako sile u parovima mišića nisu jednake, prsten poprima oblik elipse (slika 19) čije poluosi odgovaraju opterećenju N_r koja odgovara razlici u radijusima. Time je odnos poluosi sljedeći:

$$\frac{a}{b} = P_v + \frac{N_r}{P_h} + N_r \quad (29)$$

gdje je N_r radijalno opterećenje prstena, a P_h i P_v su sile u mišićima.



Slika 19. Eliptični oblik prstena

7. ZAKLJUČAK

Tijekom evolucijskog razvoja bjeloočnica i rožnica su se optimalno prilagodile svojim zadaćama u oku. Iako su spojene i formiraju jednu zatvorenu ovojnicu, njihova strukturna i mehanička svojstva su znatno različita, kao i njihove zadaće.

Prozirna rožnica ima ulogu propuštanja svjetlosti u unutrašnjost oka, a bjeloočnica se opire intraokularnom tlaku i održava stalan oblik očne jabučice.

Struktura i čvrstoća bjeloočnice optimalno su prilagođene membranskim naprezanjima, ali neki genetski ili stečeni poremećaji mogu poremetiti tu sukladnost, pa to može, primjerice u glaukomu ili progresivnoj miopiji dovesti do oštećenja očnog živca i deformacije očne jabučice, pri čemu bitnu ulogu mogu imati mehanokemijska strukturna i dimenzijska svojstva bjeloočnice. Pokazano je da su odstupanja od kugle vrlo mala pa se bjeloočnica može proračunati kao tanka sferna ljuska. Valja naglasiti da iako je membransko naprezanje bjeloočnice na njenom stražnjem dijelu najmanje, oštećenje očnog živca nastaje zbog popuštanja *lamine cribrose* koja ima mnogo manju čvrstoću od bjeloočnice.

LITERATURA

- [1] Nikolić, V.: Principi biomehanike, Naknada Ljevak, Zagreb, 2011.
- [2] Avetisov, E., Saulgozis, J., Volkolakova, R.: Nonuniformity of the deformation properties of the sclera of the human eye, *Annals of Ophtalmology*, 1978., 6, 35-38
- [3] <http://www.rochester.edu/news/show.php?id=2299> [Mrežno] [Pristupljeno: 10.9.2013.]
- [4] <http://graphics.stanford.edu> [Mrežno] [Pristupljeno: 5.9.2013.]
- [5] <http://optometrist.com.au/narrow-chances-developing-acute-narrow-angle-glaucoma/> [Mrežno] [Pristupljeno: 10.9.2013.]
- [6] http://www.be2020.com/UserFiles/Image/glaucoma_1.gif [Mrežno] [Pristupljeno: 10.9.2013.]
- [7] Komai, Y., Ushiki, T.: The three-dimensional organization of collagen fibrils in the human cornea and sclera, *Investigative Ophthalmology % Visual Science*, 1991., 32, 2244-2258.
- [8] Maurice, D.M.: The structure and transparency of the cornea, *Physiology*, 1957., 136, 263-286.
- [9] Dua, H.: A Novel Pre-Descemet's Layer (Dua's Layer), *Ophthalmology*, 2013., 120.
- [10] Bron, A.J., Tripathi, R.C., Tripathi, B.J.: *Wolff's Anatomy of the Eye and Orbit*. 8th Edition, Chapman and Hall Medical, London, 1997.
- [11] Foster, C.S., Sainz de la Maza, M.: *The Sclera*, Springer-Verlag, New York, 1994.
- [12] Hogan, M.J., Alvarado, J.A., Weddell, J.E.: *Histology of the Human Eye*, Saunders Company, Philadelphia, 1971.
- [13] <http://marineyes.com/anatomy/muscles.html> [Mrežno] [Pristupljeno: 11.9.2013.]
- [14] <http://www.glaucoma-eye-info.com/Optic-Nerve.html> [Mrežno] [Pristupljeno: 12.9.2013.]

- [15] Marshall, G.E.: Human scleral elastic system: an immunoelectron microscopic study, *Ophthalmology*, 1995., 79, 57-64.
- [16] Keeley, F.W., Morin, J.D., Vesely, S.: Characterization of collagen from normal human sclera, *Experimental Eye Research*, 1984., 39, 533-542.
- [17] Wessel, H., Anderson, S., Fite, D., Halvas, E., Hempel, J., SundarRaj, N.: Type XII collagen contributes to diversities in human corneal and limbal extracellular matrices, *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 1997., 38., 2408-2422.
- [18] Marshall, G.E., Konstas, A.G., Lee, W.R.: Collagens in the aged human macular sclera, *Current Eye Research*, 1993., 12., 143-153.
- [19] Watson, P.G., Young, R.D.: Scleral structure, organisation and disease, *Experimental Eye Research*, 2004., 78., 609-623.
- [20] Curtin, B.J.: Physiopathologic aspects of scleral stress-strain, *Transactions of the American Ophthalmological Society*, 1969., 67., 417-461.
- [21] Kokott, W.: Uber mechanisch-funktionelle Strukturen des Auges, *A von Graefes Arch Ophthalmol*, 1938., 138, 424-485.
- [22] Thale, A., Tillmann, B., Rochels, R.: Scanning electron microscopic studies of the collagen architecture of the human sclera—normal and pathological findings, *Ophthalmologica*, 1996., 210, 137-141.
- [23] Krachmer, J.H., Mannis, M.J., Holland, E.J.: *Cornea, Volume 1, Fundamental, diagnosis and mangement*, Elsevier Mosby, Philadelphia, 2005.
- [24] Trier, K.: The Sclera, *Advances in Organ Biology*, 2005., 10, 353-373.
- [25] Rada, J.A., Nickla, D.L., Troilo, D.: Decreased proteoglycan synthesis associated with form deprivation myopia in mature primate eyes, *Investigative Ophthalmology % Visual Science*, 2000., 41, 2050-2058.
- [26] Moses, R.A., Grodzki, W.J., Starcher, B.C., Galione, M.J.: Elastin content of the scleral spur, trabecular mesh, and sclera, *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 1978., 17, 817-818.

- [27] Alfrević, I.: Linearna analiza konstrukcija, FSB Zagreb, 2011.